

## Laseroptische Untersuchung des Strömungsfeldes hinter dem Turbinengitter eines Simulationsprüfstandes mittels Filtered Rayleigh Scattering

Laser-optical characterization of the flow field behind the NGV cascade of a three-sector combustor simulator using filtered Rayleigh scattering

**Michael Dues**<sup>1\*</sup>, **Ulrich Doll**<sup>2</sup>, **Tommaso Bacci**<sup>3</sup>, **Alessio Picchi**<sup>3</sup>, **Guido Stockhausen**<sup>4</sup>,  
**Christian Willert**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ILA R&D GmbH, Jülich, Germany

<sup>2</sup> Paul Scherrer Institute, 5232 Villigen PSI, Switzerland

<sup>3</sup> Università degli Studi di Firenze (UNIFI), 50139 Firenze, Italy

<sup>4</sup> Institute of Propulsion Technology, German Aerospace Centre (DLR), 51170 Köln, Germany

\* Correspondent author: dues@ila.de

**Schlagworte:** filtered Rayleigh scattering, Turbinenströmung, Temperatur, Druck, Strömungsgeschwindigkeit, Doppler shift

**Keywords:** filtered Rayleigh scattering, turbine flow, temperature, pressure, flow velocity, Doppler shift

### Zusammenfassung

Mit der Umsetzung auf Magerverbrennung basierender Brennkammerkonzepte für Fluggasturbinen gehen verstärkt Störungen des Strömungsfeldes in den Eintrittsstufen der Turbine einher, die u.a. durch starke Drallkomponenten und Temperaturgradienten gekennzeichnet sind. Zur Untersuchung derartiger Strömungsstrukturen in den Eintritts- und Austrittsebenen von Turbinengittern wurde am Laboratory of Technologies for High Temperature der Universität Florenz ein Simulationsprüfstand entwickelt, der eine gezielte Einstellung der Massenströme und Temperaturen für die Wandkühlung, die Schaufelkühlung und der Kanalströmung im Bereich der Schaufelumströmung gestattet.

Die Untersuchung dieser Strömungsstrukturen erfolgte u.a. mit dem Messverfahren Filtered Rayleigh Scattering (FRS), das in den vergangenen Jahren am Institut für Antriebstechnik des DLR in Köln, erweitert um die Methode des frequency scanning (FSM-FRS), etabliert wurde. In den dargestellten Untersuchungen werden mit Hilfe der FSM-FRS-Technik gleichzeitig Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder in der Abströmung eines Turbinengitters optisch erfasst und mit Sondenmessungen verglichen.

## Einleitung

Für die Optimierung moderner Brennkammersysteme für Fluggasturbinen ist die Untersuchung von Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen in der Zu- und Abströmung der Turbinenschaufeln von großer Bedeutung. Im Rahmen des EU-Vorhabens FACTOR wurde dazu am THT Lab (Laboratory of Technologies for High Temperature) der Universität Florenz ein Prüfstand entwickelt, der die Untersuchung von repräsentativen Temperaturverteilungen und Drallströmungen sowie die Wirkung von Schaufelkühlungen gestattet (Bacci et al, 2015).

Zur Untersuchung derartiger Strömungen werden häufig konventionelle Messtechniken wie Fünfflochsonden mit zusätzlichen Temperatursensoren eingesetzt, da diese erprobt und hinsichtlich der Messunsicherheit gut eingeschätzt werden können (Heinke et al, 2004; Luque et al, 2015; Qureshi et al, 2012). Nachteilig an diesen konventionellen Methoden, speziell Sondenmessungen, ist jedoch, dass diese die Strömung vor allem in engen Strömungskanälen, wie sie für Turbomaschinen typisch sind, beeinflussen (Aschenbruck et al, 2015; Sanders et al, 2017). Darüber hinaus sind Sonden in ihrer räumlichen Auflösung und im Temperaturbereich begrenzt und können nur mit großem Aufwand in rotierenden Systemen eingesetzt werden. Daher ist die Entwicklung optischer Methoden zur Strömungsuntersuchung weiterhin von großer Bedeutung.

Die laseroptische Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern mittels PIV hat in den vergangenen 20 Jahren erhebliche Fortschritte gemacht und diese Methode zu einem praxistauglichen Standardverfahren vieler Labore werden lassen. Ein ähnlich leistungsfähiges und verlässliches optisches Verfahren zur Erfassung von Temperaturverteilungen ist jedoch bisher nicht verfügbar. CARS und RAMAN liefern genaue instationäre Temperaturmessungen, sind aber bisher auf Punktmessungen begrenzt. Klassische Laser Rayleigh Verfahren sind zur Messung von Temperaturfeldern geeignet, können aber wegen ihrer Empfindlichkeit hinsichtlich Wandreflexionen nicht zur Untersuchung in den engen Strömungskanälen eingesetzt werden.

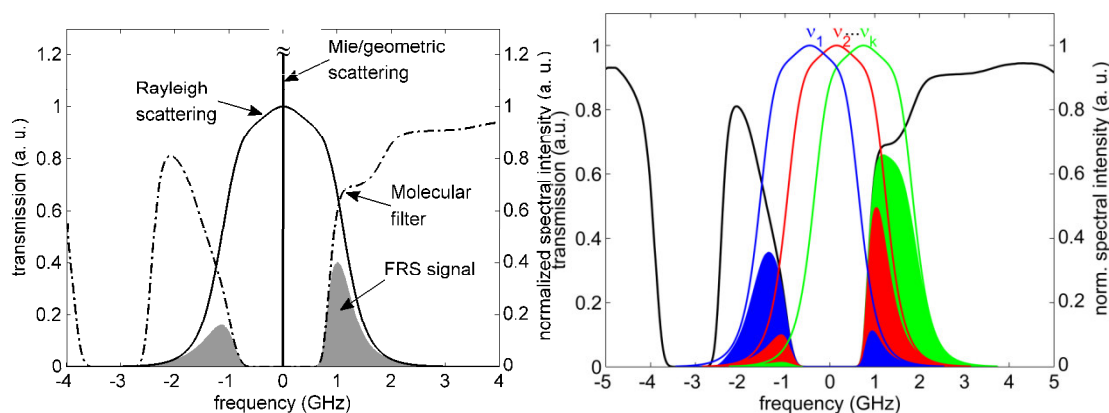
Die Weiterentwicklung der Filtered Rayleigh Scattering Messtechnik (FRS) durch das DLR Köln, erweitert mit der Methode des Frequency Scanning (FSM-FRS) (Doll et al, 2014; Forkey, 1996) , könnte daher einen sinnvollen Betrag zur Untersuchung von Strömungsfeldern darstellen, weil

- FSM-FRS kann dieselben optischen Zugänge wie PIV nutzen. Daher ist die Methode auch an vielen schon bestehenden Prüfständen einsetzbar.
- FSM-FRS benötigt keine Partikel in der Strömung. Daher ist diese Methode auch für stark drallbehaftete Strömungen oder für kryogene Anwendungen geeignet.
- FSM-FRS ist auch für die Untersuchung von wandnahen Strömungen oder in engen Kanälen geeignet, da Wandreflexe durch die mittels molekularer Absorption weitgehend herausgefiltert werden können.
- FSM-FRS ermöglicht die zeitlich gemittelte gleichzeitige flächige Erfassung von Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckfeldern (Doll et al, 2017) .
- FSM-FRS stellt Multiparameterdatensätze mit hoher örtlicher Auflösung für den Vergleich mit CFD-Daten zur Verfügung.

Im vorliegenden Beitrag wird FSM-FRS für die Untersuchung der Temperatur-, Druck- und Geschwindigkeitsfelder hinter den Leitschaufeln eines Hochdruck-Turbinensegments stromab eines (Mager-) Brennkammersimulators einer Fluggasturbine eingesetzt und mit den Daten einer konventionellen Fünflochsonde mit Temperatursensor verglichen.

## FSM-FRS-Messprinzip

Die FSM-FRS-Methode beruht auf der Auswertung der Rayleigh-Streuung des Laserlichts an den Gasmolekülen in der Strömung. Die an den Gasmolekülen auftretende Rayleigh-Streuung weist eine spektrale Verteilung von einigen GHz Breite auf und enthält Informationen über Temperatur, Druck, Geschwindigkeit und Dichte im beleuchteten Messbereich. Reflexionen von Laserlicht an Wänden (geometrische Streuung) oder an Partikeln (Mie-Streuung) werden jedoch nicht in der Frequenz verbreitert und können mit Hilfe eines molekularen Filters, hier einer Jodzelle, aus dem Messsignal herausgefiltert werden.



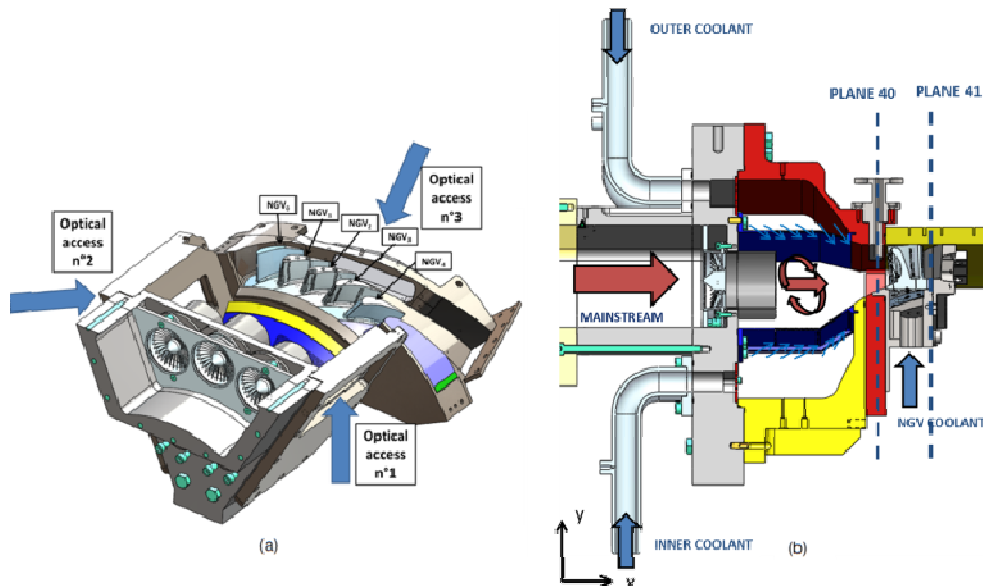
**Bild 1 (links):** Das an den Fluidmolekülen Rayleigh-gestreuete Licht des schmalbandigen Lasers wird mit einer Jodzelle gefiltert, wodurch Reflexionen an Oberflächen und Streuung an großen Partikeln (Mie-Streuung) entfernt werden. **Bild 2 (rechts):** Frequenz-Scan Methode: Die Laserfrequenz wird entlang des Transmissionsprofils des molekularen Filters verschoben. Aus den resultierenden Intensitätsspektren können zeitlich gemittelte Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (Doppler-Verschiebung) simultan ermittelt werden.

Das an den Molekülen gestreute Licht wird durch die Jodzelle auf einen CCD-Sensor abgebildet und in einen Intensitätswert übertragen. Dadurch geht jedoch die spektrale Information über Temperatur, Druck, Dichte und Geschwindigkeit verloren. Entsprechend dem vom DLR Köln weiterentwickelten FSM-FRS-Verfahren wird daher die Frequenz des Lasersystems in diskreten Schritten entlang der Filterkurve der Jodzelle variiert, so dass für jedes Pixel ein Intensitätsverlauf abhängig von der Laserfrequenz entsteht. Aus diesem Intensitätsverlauf kann mit Hilfe des Tenti-Modells die Temperatur, der Druck, die Geschwindigkeit und die Dichte rekonstruiert werden. Da das Tenti-Modell jedoch zu systematischen Temperaturabweichungen in der Größenordnung von 10-15K führt, wurde für die vorliegenden Untersuchungen ein parametrisiertes Kalibriermodell (Doll et al, 2016) zur Rekonstruktion der Messdaten eingesetzt.

## Aufbau des Versuchsstandes

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem nichtreaktiven Simulationsprüfstand der Universität Florenz im THT Lab (Laboratory of Technologies for High Temperature) durchgeführt (Bild 3). Der Simulator, der mit vorgewärmter Luft betrieben wird, besteht aus

drei Sektoren. Die roten Pfeile kennzeichnen den Eintrittsbereich der auf bis zu 423 K aufgeheizten Heißluftströmung, die blauen Pfeile die von außen zugeführte Kühlluft für die Gehäuse- und Schaufelkühlung. In einer Mischkammer wird der heiße Luftstrom mit drei axialen Drallgeneratoren stark verwirbelt, so dass in der Eintrittsebene des nachfolgenden Turbinengitters (Plane 40) eine starke verwirbelte Strömung mit Drallwinkeln von bis zu 50° und Turbulenzintensitäten von ca. 30% entstehen, die sich mit der durch die perforierte Gehäusewand austretende Kühlluft vermischt.

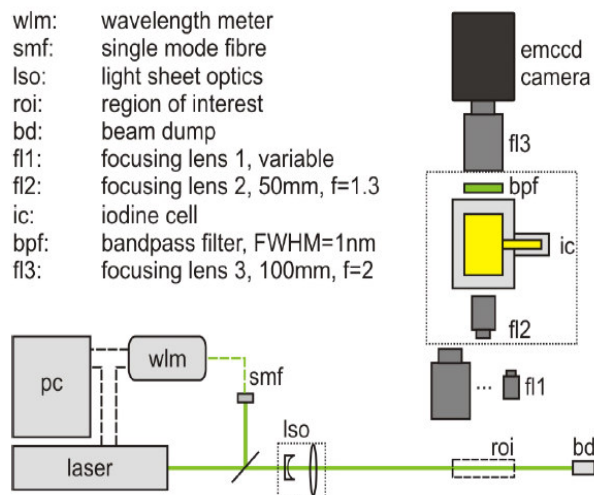


**Bild 3:** Simulationsprüfstand für Turbinenströmungen der Universität Florenz

Das nachfolgend angeordnete Turbinengitter besteht aus fünf Schaufeln. Die drei mittleren Schaufeln sind mit einer Schaufelkühlung ausgestattet, die mit Umgebungsluft gespeist wird. Für die Durchführung von laseroptischen Untersuchungen stehen drei Beobachtungsfenster zur Verfügung, von denen das Fenster Nr.3 als optischer Zugang für die in diesem Beitrag vorgestellten FSM-FRS-Messungen in der Abströmung des Turbinengitters (Plane 41) dient.

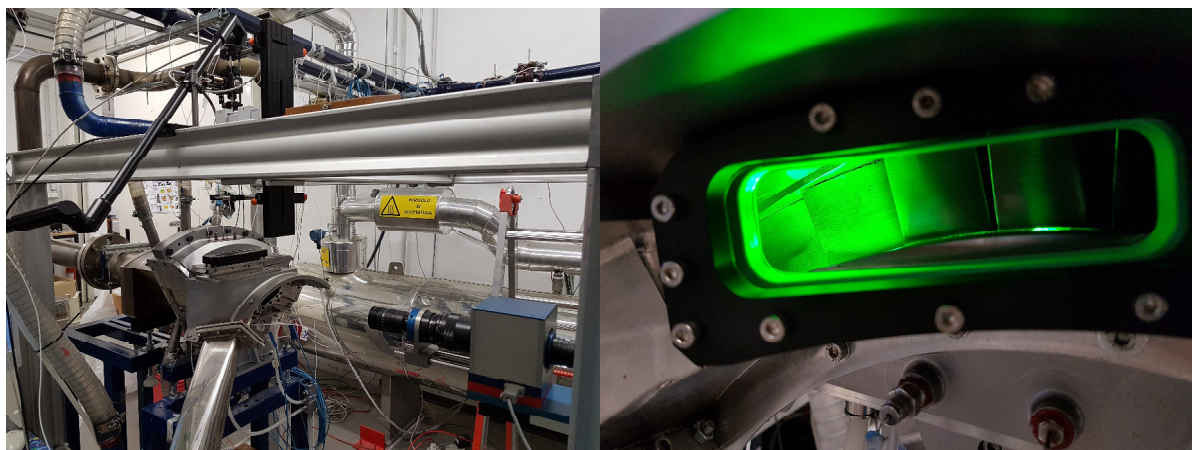
### Aufbau des FSM-FRS-Messsystems

Das FSM-FRS-Messsystem basiert auf einem Coherent Verdi V5 Nd:YVO<sub>4</sub> Dauerstrich-Festkörperlaser mit max. 6 W Ausgangsleistung, der Licht bei 532 nm mit einer Bandbreite von weniger als 5 MHz emittiert. Die Frequenz des Laserlichtes kann über die Etalontemperatur und die Resonatorlänge mit zwei Piezo-Aktuatoren in einem Bereich von 60 GHz variiert werden. Zur Stabilisierung der Laserfrequenz auf Abweichungen kleiner 2 MHz wird der Regelausgang eines Wavelengthmeters der Firma High Finesse eingesetzt. Die Bilderfassung erfolgt mit einer back illuminated C9100-13 EM-CCD Kamera der Firma Hamamatsu. Die maximale Auflösung des Detektors beträgt 512x512 Pixel bei einer Pixelgröße von 16µm x 16 µm. Die Quanteneffizienz ist für 532 nm größer als 90 %. Zwischen Kamera und Objektiv ist ein Bandpassfilter (Barr, FWHM 1nm) sowie die Jodzelle angeordnet, die auf 0,1°C genau temperaturgeregelt wird.



**Bild 4:** Komponenten des FSM-FRS-Systems

Das Kamerasystem mit Jodzelle wird auf einer optischen Schiene vor dem Fenster Nr.3 angeordnet. Die Einkopplung des Lichtschnittes erfolgt durch einen oberhalb der Messebene Plane 41 angeordneten Fensterschlitz.



**Bild 5 links:** Anordnung von Kameramodul mit Jodzelle und Lichtschnitt am Turbinensimulationsprüfstand, rechts: optischer Zugang zur Abströmebene des Turbinengitters (Plane 41)

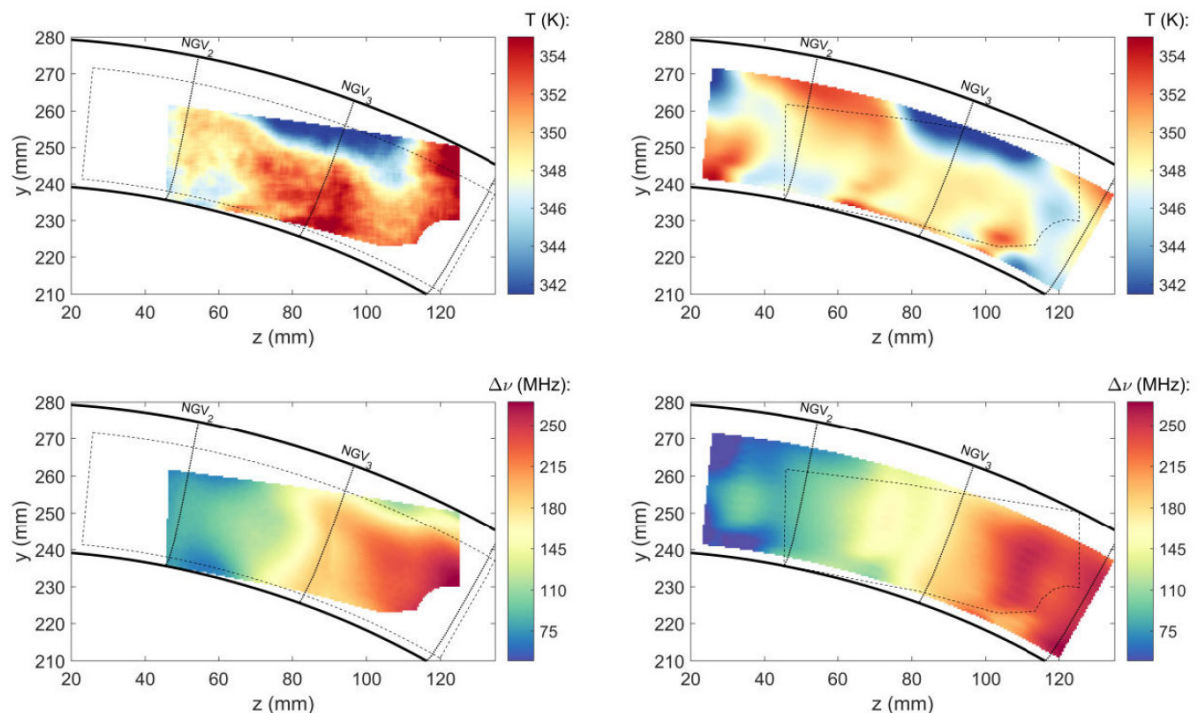
### Aufbau des Sondenmesssystems

Die Sondenmessungen erfolgen mit einer Fünflochsonde vom Typ Cobra (Vectoflow), die mit einem zusätzlichen Temperatursensor am Kopf der Sonde ausgestattet ist. Dieser Temperatursensor ist mit einer zusätzlichen Einhausung versehen, die eine starke Queranströmung des Temperatursensors vermeiden soll. Die Sonde kann mit einer Traversiervorrichtung in radialer und tangentialer Richtung automatisch verfahren werden. In Messebene 41 werden so im Abstand von 2,5mm radial und 1° Abstand tangential insgesamt 335 Messpunkte abgefahren. Damit wird in tangentialer Richtung eine Auflösung von 10 Messwerten pro Gitterteilung erreicht.

## Ergebnisse

Mit FRS durchgeführte Geschwindigkeitsmessungen basieren auf der Dopplerverschiebung. Für eine gegebene Kamera- und Lichtschnittanordnung ist die entsprechende Dopplerverschiebung proportional der Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf die Winkelhalbierende zwischen Kamera und Lichtschnitt. Da in den hier vorgestellten Untersuchungen aufgrund der optischen Zugänglichkeit nur Messungen aus einer Kameraperspektive durchgeführt wurden, ist eine Messung der eigentlichen Geschwindigkeitskomponenten  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  nicht möglich. Um trotzdem einen Vergleich zwischen Sondenmessungen und FRS-Messungen zu ermöglichen, werden die Geschwindigkeitsdaten der Sonde in Dopplerfrequenzen umgerechnet.

Bild 6 zeigt den Vergleich der Temperatur- und Dopplershift-Verteilungen der FSM-FRS-Messung (links) und der Sondenmessung (rechts). Bedingt durch die Sondengeometrie einerseits und die begrenzte optische Zugänglichkeit andererseits sind sowohl die Sonden- als auch die FSM-FRS-Messungen nur in eingeschränkten Bereichen möglich, die jeweiligen Messbereiche sind mit gepunkteten Linien gekennzeichnet. Die Projektionen der Austrittskanten der Turbinenschaufeln NGV2 und NGV3 in die Messebene sind gleichfalls markiert.

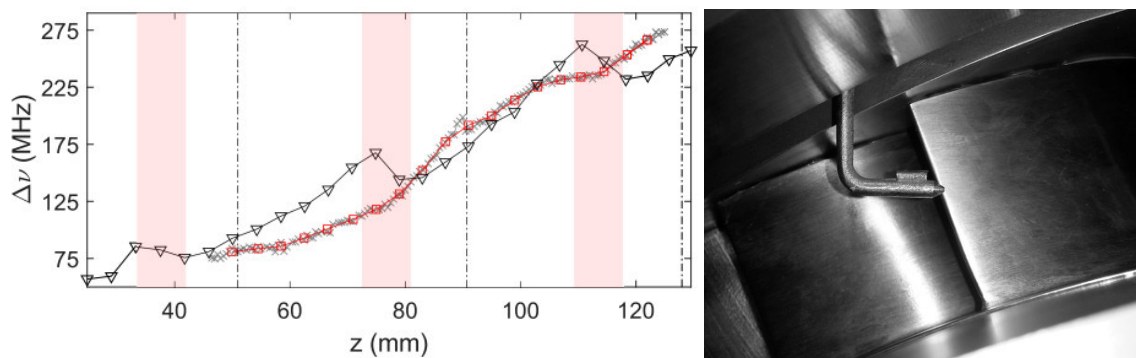


**Bild 6:** Vergleich von Temperatur (oben) und Doppler shift (unten) gemessen mit FSM-FRS (links) und mit einer Fünflochsonde (rechts)

Die Temperaturverteilung beider Messverfahren zeigt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung hinsichtlich Absolutwert und Verteilung. Beide Messverfahren detektieren eine kalte Strähne ausgehend von der äußeren Gehäusewand zwischen NGV2 und NGV3 und eine kältere Zone am Fuss der Schaufel NGV2. Während für die Sondenmessungen (rechts) sich die kalte Strähne jedoch bis zum inneren Gehäuse erstreckt, bleibt für die FSM-FRS-Messungen diese Strähne auf den äußeren und mittleren Radienbereich begrenzt. Die FSM-FRS-Messungen zeigen dort um ca. 5 K höhere Temperaturen und stärker ausgebildete Temperaturgradienten.



Auch die Dopplerfrequenzen beider Messverfahren zeigen eine gute Übereinstimmung in Verteilung und Höhe. Während jedoch die FRS-Messungen (links) einen relativ starken Gradienten in der Dopplerfrequenz stromab von NGV3 aufzeigen, erscheint dieser Bereich in den Sondenmessungen diffuser und unscharf. Einen detaillierten Blick auf die tangentielle Verteilung der Dopplerfrequenz beider Messverfahren gestattet Bild 7, in dem die Dopplershift auf einem mittleren Radius über dem Umfang über zwei Schaufelkanälen dargestellt ist. Die rot transparenten Zonen markieren die Nachlaufbereiche der Turbinenschaufeln, die hinsichtlich Größe und Position entsprechend (Ainley & Mathieson, 1951; Lakshminarayana & Davino, 1980) ermittelt wurden.



**Bild 7 links:** Doppler-shift auf einem mittleren Radius in der Abströmung der Turbinenschaufeln (Fünflochsonde schwarz  $\nabla$ , FSM-FRS grau  $\times$ , auf Fünflochsondengitter projizierte FSM-FRS Ergebnisse rot  $\square$ ), **rechts:** Anordnung und Größe der Fünflochsonde im Vergleich zum Gitterkanal

Der starke Abfall der Dopplerfrequenz der Sondenmessung im Schaufelnachlauf steht vermutlich im Zusammenhang mit Fehlmessungen der Sonde, verursacht durch den starken Druckgradienten in diesem Bereich, wie es auch in (Aschenbruck et al, 2015; Hoenen et al, 2012; Sanders et al, 2017) dargestellt wird. Darüber hinaus könnten die Unterschiede in der Dopplerfrequenz beider Messverfahren innerhalb der Schaufelkanäle auch auf die Störung der Strömung durch den Sondenkörper selbst zurückzuführen sein. Bild 7 (rechts) verdeutlicht, dass die Größe des Sondenkörpers im Vergleich zur Größe des Schaufelkanals nicht vernachlässigbar ist und damit Blockageeffekte und eine lokale Beeinflussung der Geschwindigkeitsverteilung nicht ausgeschlossen werden können.

## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag werden an einem mit vorgeheizter Luft betriebenen, nicht-reaktiven Simulationsprüfstand der Universität Florenz vergleichende Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen in der Abströmung eines Turbinengitters einerseits mit einer konventionellen Fünflochsonde, andererseits mit dem laseroptischen FSM-FRS-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse beider Messverfahren werden hinsichtlich der Einsatzmöglichkeit und Grenzen diskutiert.

Im Allgemeinen zeigen beide Messverfahren vergleichbare Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen. Eine detailliertere Analyse zeigt jedoch, dass eine Interaktion zwischen dem Sondenkopf und der Strömung zu vermuten ist, die zu abweichenden Geschwindigkeitswerten vor allem im Bereich des Schaufelnachlaufs und auch zu Blockageeffekten zwischen den Schaufeln führt. Weitere FSM-FRS-Messungen aus anderen Kamerapositionen bzw. andere Lichtschnittrichtungen könnten detailliertere Daten zur Geschwindigkeitsverteilung zur Untersuchung der Interaktion der Sonde mit der Strömung zur Verfügung stellen.

Fünflochsonden, zusätzlich ausgestattet mit Temperatursensoren, stellen eine gut erprobte Messmethode mit geringer und bekannter Messunsicherheit für die Untersuchung von Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern dar. Die räumliche Auflösung der Systeme ist jedoch durch die Größe des Sondenkopfes und durch die Anzahl der traversierenden Messorte begrenzt. In Turbomaschinen ist jedoch eine mögliche Interaktion des Sondenkopfes mit der Strömung im Bereich von Schaufelnachläufen, Wirbeln und im Gehäusebereich zu berücksichtigen. Eine Messung mit Sonden in rotierenden Systemen ist außerordentlich aufwendig. In der vorgestellten Konfiguration ist, bedingt durch die optische Zugänglichkeit, die mit FSM-FRS ermittelte Geschwindigkeitsinformation begrenzt. Die räumliche Auflösung der gewonnenen Temperatur- und Geschwindigkeitsdaten ist jedoch bemerkenswert hoch und im Wesentlichen nur durch die Kameraauflösung begrenzt. Das optische Messverfahren ist hinsichtlich der Strömung selbst rückwirkungsfrei. Mit FSM-FRS könnten zukünftig optische Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen auch in rotierenden Systemen bei hohen Temperaturen und Drücken durchgeführt werden.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des FACTOR Projektes (Full Aerothermal Combustor Turbine Interactions Research) und mit freundlicher Förderung durch die EU durchgeführt.

## Literatur

- Ainley, D. G. & Mathieson, G. C. R. (1951) *A Method of Performance Estimation for Axial-flow Turbines* H.M. Stationery Office.
- Aschenbruck, J., Hauptmann, T. & Seume, J. R. (2015) Influence of a multi-hole pressure probe on the flow field in axial-turbines, *11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2015*.
- Bacci, T., Cacioli, G., Facchini, B., Tarchi, L., Koupper, C. & Champion, J.-L. (2015) Flowfield and Temperature Profiles Measurements on a Combustor Simulator Dedicated to Hot Streaks Generation, *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*.
- Doll, U., Stockhausen, G. & Willert, C. (2014) Endoscopic filtered Rayleigh scattering for the analysis of ducted gas flows. *Experiments in Fluids*, 55(3), 1-13.
- Doll, U., Burow, E., Stockhausen, G. & Willert, C. (2016) Methods to improve pressure, temperature and velocity accuracies of filtered Rayleigh scattering measurements in gaseous flows. *Measurement Science and Technology*, 27(12), 125204-125204.
- Doll, U., Stockhausen, G. & Willert, C. (2017) Pressure, temperature, and three-component velocity fields by filtered Rayleigh scattering velocimetry. *Opt. Lett.*, 42(19), 3773-3776.
- Forkey, J. (1996) *Development and Demonstration of Filtered Rayleigh Scattering: a Laser Based Flow Diagnostic for Planar Measurement of Velocity, Temperature and Pressure* Princeton University.
- Heinke, W., König, S., Matyschok, B., Stoffel, B., Fiala, A. & Heinig, K. (2004) Experimental investigations on steady wake effects in a high-lift turbine cascade. *Experiments in Fluids*, 37(4), 488-496.
- Hoenen, H. T., Kunte, R., Waniczek, P. & Jeschke, P. (2012) Measuring Failures and Correction Methods for Pneumatic Multi-Hole Probes, *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*.
- Lakshminarayana, B. & Davino, R. (1980) Mean Velocity and Decay Characteristics of the Guidevane and Stator Blade Wake of an Axial Flow Compressor. *Journal of Engineering for Power*, 102(1), 50-60.
- Luque, S., Kanjirakkad, V., Aslanidou, I., Lubbock, R., Rosic, B. & Uchida, S. (2015) A New Experimental Facility to Investigate Combustor-Turbine Interactions in Gas Turbines With Multiple Can Combustors. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(5).
- Qureshi, I., Smith, A. D. & Povey, T. (2012) HP Vane Aerodynamics and Heat Transfer in the Presence of Aggressive Inlet Swirl. *Journal of Turbomachinery*, 135(2), 021040--021040-13-021040.
- Sanders, C., Terstegen, M., Hölle, M., Jeschke, P., Schönenborn, H. & Fröbel, T. (2017) Numerical Studies on the Intrusive Influence of a Five-Hole Pressure Probe in a High-Speed Axial Compressor, *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*.